

INFORME TÉCNICO

EL NUEVO ESTÁNDAR EN MATERIA DE INTELIGENCIA GEOTÉRMICA

Cómo el flujo de trabajo conectado de Seequent agiliza la exploración, reduce los riesgos de las perforaciones y optimiza el rendimiento del campo.

Resumen ejecutivo	03
-------------------	----

CAPÍTULO 1	04
Del riesgo en las exploraciones a los recursos financieros	

CAPÍTULO 2	08
Cómo convertir los datos multidisciplinarios en un modelo 3D dinámico	

CAPÍTULO 3	11
Simulación fiable de caudal, presión y potencia de salida	

CAPÍTULO 4	14
Entender el subsuelo con una solución geotérmica completa	

CAPÍTULO 5	16
El futuro de las geociencias: innovación, educación y colaboración	



Resumen ejecutivo

Todos los proyectos geotérmicos comienzan con una única pregunta crítica: ¿qué tan bien entendemos el subsuelo?

Una comprensión inadecuada del yacimiento genera estrategias de desarrollo deficientes, una orientación inadecuada de los pozos y una baja confianza en las predicciones de la producción futura de energía. Esto aumenta los costos de capital y operativos, y pone en riesgo los ingresos futuros, lo que deteriora el resultado final del proyecto, mucho antes de que el primer megavatio llegue a la red.

A pesar de este riesgo, muchos equipos encargados de los yacimientos aún trabajan de manera aislada. Los datos del estudio de campo geofísico se encuentran en una aplicación; la geología 3D, en otra; y la simulación de flujo, en una tercera, todos unidos mediante hojas de cálculo y secuencias de comando ad hoc. Los historiales de versiones no son claros, y, a menudo, se pasan por alto procesos físicos y ciclos de retroalimentación importantes, y el modelo final es difícil de defender cuando las aprobaciones de la junta o las revisiones de los prestamistas requieren transparencia.

Este informe técnico se redactó para ingenieros de yacimientos geotérmicos, geocientíficos y desarrolladores de proyectos que necesitan reducir la incertidumbre, acelerar el desarrollo y justificar las decisiones de inversión. En él, se describe un flujo de trabajo conectado de Seequent (entre Oasis montaj, Leapfrog Energy y Volsung) que integra el modelado geofísico y geológico, la interpretación y la simulación de yacimientos, lo que permite tomar decisiones más rápidas y auditables.

En las siguientes páginas, se detalla cómo este flujo de trabajo conectado agiliza la exploración, reduce los riesgos de las perforaciones y maximiza el valor de los activos, todo esto ilustrado con resultados reales de Fervo (sistemas geotérmicos mejorados [Enhanced Geothermal Systems, EGS] en terrenos vírgenes), Contact Energy (desarrollo acelerado) y Ormat (optimización de campo).



CAPÍTULO 1

Del riesgo en las exploraciones a los recursos financieros

Antes del diseño de la planta, de las negociaciones para la compra de energía o del consentimiento medioambiental, el éxito de la energía geotérmica se decide por los primeros pozos. Un solo pozo productor o inyector profundo suele costar entre 4 y 12 millones de dólares¹, y si intercepta una zona estrecha o de baja temperatura, ese capital se amortiza y el avance del proyecto se ralentiza antes de verter el hormigón.

Los estudios de cartera muestran que, en el caso de los EGS de roca dura o de yacimientos sedimentarios profundos, los gastos de capital de exploración pueden consumir el 15 % del gasto total del proyecto, mientras que las tasas de éxito de los pozos comerciales se mantienen cerca del 50 %.²

Si se retrasa el inicio, el proyecto se paraliza; si se adelanta, todo lo que viene después, es decir, la financiación, la construcción y la puesta en marcha, se acelera.

1. Stanford, "2025 Geothermal Drilling Cost Curves Update" (Actualización a 2025 de las curvas de costos de perforación geotérmica), 2025.

2. Climate Policy Initiative, "The Role of Public Finance in Deploying Geothermal: Background Paper", (El rol de las finanzas públicas en el despliegue de la energía geotérmica: documento de referencia), 2014.

Los desafíos de los flujos de trabajo heredados

Los flujos de trabajo de exploración siguen pareciéndose mucho a los de hace una década:

- **Geofísica:** las inversiones ejecutadas en paquetes especializados se exportan como cuadrículas ráster.
- **Geología:** las secciones transversales y los modelos implícitos se reconstruyen desde cero en una herramienta independiente.
- **Preselección de yacimientos:** los cálculos volumétricos y las estimaciones simples del calor in situ se realizan en hojas de cálculo.

Cada transferencia entre herramientas a menudo requiere un proceso de formateo o interpolación de datos, como ajustar resoluciones de cuadrícula, convertir unidades y documentar suposiciones de forma manual.

Los historiales de versiones se fragmentan, las suposiciones se ocultan en macros, y probar una teoría conceptual puede

llevar meses. El resultado es un ciclo de interpretación, congelación y perforación, en lugar de un bucle basado en datos que refina las estructuras, reordena las plataformas y alinea la geología con la economía en tiempo real.

La velocidad importa. La Agencia Internacional de las Energías Renovables proyecta que la generación geotérmica podría representar el 15 % de la energía para 2050,³ pero solo si se reduce sustancialmente la incertidumbre del subsuelo y se acortan los plazos de desarrollo.

Cada mes dedicado a conciliar las inversiones inconsistentes o al proceso de formatear los modelos para pasar de una herramienta a otra aumentan los costos de financiación y el riesgo de que caduquen las licencias. En el campo de la energía geotérmica, la verdadera limitación al crecimiento no es el calor del suelo, sino la claridad y la velocidad con la que podemos demostrar su potencial.



3. IEA, "The Future of Geothermal Energy" (El futuro de la energía geotérmica), 2024.

Presentamos un paquete tecnológico de exploración conectada

El flujo de trabajo conectado de Seequent ayuda a reducir la brecha en cuanto a claridad y velocidad:

- Oasis montaj apoya la exploración geotérmica mediante el procesamiento y la visualización de datos gravitatorios, magnéticos y electromagnéticos (EM).
- Los modelos de resistividad magnetotelúrica (MT) se pueden importar y visualizar con estos conjuntos de datos para ayudar a los geocientíficos a interpretar las estructuras del subsuelo, perfeccionar las hipótesis geológicas y fundamentar el modelado conceptual.
- Leapfrog Energy incorpora esos datos, junto con registros de lodos, datos de alteración y estudios de campo de presión, temperatura y rotación (Pressure, Temperature and Spinner, PTS), para crear un modelo geológico en 3D implícito en tiempo real.
- Volsung importa el modelo de Leapfrog, ejecuta una simulación de yacimiento de volumen finito que acopla modelos de pozos e instalaciones de superficie, genera coincidencias históricas y previsiones de producción, todo dentro del mismo ecosistema.

Dado que cada paso comparte una estructura de datos común, los equipos pasan de la inversión a la previsión en cuestión de días, en lugar de meses, y mantienen un único registro de auditoría a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto.

Cómo Fervo Energy aceleró un proyecto piloto de EGS que ahora suministra energía a los centros de datos de Google

Para demostrar que los EGS de pozos horizontales podían suministrar energía continua libre de carbono, Fervo Energy primero tuvo que generar imágenes de corredores de fracturas en el basamento granítico de Nevada; un entorno en el que la información sobre perforaciones es limitada. Los geofísicos utilizaron Oasis montaj para interpretar los datos gravitacionales, magnéticos y electromagnéticos, lo que les permitió desarrollar una comprensión conceptual de la cuenca. Entregaron estos datos a los geólogos, quienes construyeron un modelo 3D implícito en Leapfrog Energy y lo perfeccionaron con observaciones geológicas de superficie y datos de perforación. La interpretación integrada permitió realizar ajustes iterativos en las trayectorias de los pozos y sirvió de base para tomar decisiones de desarrollo más amplias.

Este cambio generó beneficios clave, entre ellos:



Perforación selectiva y menos sorpresas: los volúmenes de resistividad de alta resolución identificaron las zonas más permeables para perforaciones horizontales emparejadas de 2438,4 metros.



Iteración rápida: las inversiones actualizadas se incorporaron a los modelos de Leapfrog en cuestión de horas, lo que permitió realizar ajustes geométricos antes de la perforación.



Confianza de los compradores: las previsiones auditables respaldaron el acuerdo de energía libre de carbono las 24 horas del día y los 7 días de la semana de Fervo con Google.

[Lea la historia completa →](#)



Leapfrog Energy y Oasis montaj pueden comunicarse entre sí de forma intuitiva a través de Seequent Central, lo que nos ha permitido conectar sin problemas a múltiples personas con comunicaciones y colaboraciones esenciales en cinco oficinas repartidas por todo Estados Unidos y en muchas zonas horarias diferentes.”

Steve Fercho, Líder de Geociencia de Exploración, Fervo Energy

Cómo convertir los datos multidisciplinarios en un modelo 3D dinámico

No se puede subestimar el valor de las secciones transversales tradicionales. Sin embargo, con proyectos que avanzan rápidamente y la obtención de datos nuevos cada trimestre, mantener el ritmo es una tarea difícil.

Como parte de un flujo de trabajo conectado, el motor de función de base radial (radial basis function, RBF) de Leapfrog Energy genera superficies geológicas directamente a partir de puntos de fondo de pozo y restricciones geofísicas estructurales, lo que permite respetar los entornos geológicos complejos. Ya sea que el yacimiento sea una caldera fallada, un sistema sedimentario o un basamento granítico fracturado, los geólogos pasan de los datos brutos a un modelo estructuralmente coherente en cuestión de horas en lugar de semanas, lo que libera tiempo para que los especialistas se dediquen a la interpretación en vez de a la elaboración de borradores.

Tecnología pionera de RBF

Los inicios de Leapfrog se remontan a una tecnología diseñada originalmente para prótesis e imágenes médicas. Esta tecnología, conocida como función de base radial (radial basis function, RBF), pronto se empezó a utilizar en diversas industrias, entre ellas Hollywood (para los efectos especiales de películas como El señor de los anillos) y la NASA (para cartografiar asteroides).

Se analiza una serie de datos en 2D y 3D procedentes de fuentes geológicas, geofísicas, geoquímicas y de mapeo superficial para identificar relaciones (por ejemplo, litología frente a temperatura, alteración frente a resistividad), que sirven de base para la construcción de modelos integrados. Una vez definido el modelo geológico, el modelo numérico de Leapfrog asigna variables estáticas, como temperatura y porosidad, entre otras. Este enfoque de modelado mantiene las geometrías y las propiedades dentro de un único objeto unificado durante todo el flujo de trabajo.

Cualquier cambio en un contacto, una falla o un parámetro numérico desencadena la regeneración automática de las superficies, los volúmenes

y las cuadrículas calculadas. Los datos volumétricos en tiempo real, los diagramas de hileras y las redes estereográficas se actualizan en segundos, y muestran cómo

una nueva falla o un nuevo pozo alteran la interpretación del subsuelo. Leapfrog exporta gráficos de pozos planificados y comunicaciones conceptuales del recurso, con lo que cumple con los requisitos de trazabilidad establecidos por los prestamistas y los ingenieros independientes.

Cuando está listo para la simulación dinámica y la previsión, Leapfrog puede convertir superficies implícitas en una cuadrícula discretizada y rellenar los parámetros de la roca vinculados

al modelo conceptual. Dado que los datos permanecen dentro del mismo sistema de coordenadas, no es necesario realizar un reajuste global de la cuadrícula antes de exportarlos a Volsung, TOUGH2, Eclipse o CMG. Las actualizaciones geológicas posteriores repiten la exportación en minutos, con lo que integran la geociencia y el modelado de yacimientos, y mantienen la fidelidad de los datos.



Dato Curioso



Leapfrog apareció una vez en una respuesta del concurso Jeopardy, un programa estadounidense.

Cómo Contact Energy aceleró el desarrollo del proyecto Tauhara de 174 MW

El desarrollo Tauhara (segunda etapa) de Contact Energy es la central geotérmica de un solo destello más grande de Nueva Zelanda construida durante más de una década. Para confirmar la ubicación de los pozos y obtener las autorizaciones medioambientales, el equipo del subsuelo necesitaba un modelo 3D integrado que pudiera asimilar datos nuevos con rapidez y resistir el escrutinio regulatorio.

Mediante el uso de Leapfrog Energy, los geólogos fusionaron capas, modelos gravitacionales, inversiones magnetotelúricas y más de 70 pozos de exploración (que suman un total de 60 000 puntos de intervalo litológico y 1200 perfiles de presión y temperatura) en un único marco implícito. Las actualizaciones se propagan en minutos, lo que permite a los ingenieros probar planes de desviación alternativos durante la perforación.

Entre los principales beneficios, se incluyen los siguientes:



Los ciclos del modelo de cuatro días se redujeron a

cuatro horas: los nuevos registros de temperatura, la litología y las selecciones de alteración regeneraron todo el modelo antes de la llamada de perforación de la mañana siguiente.



Disposición optimizada de las plataformas de pozo:

los modelos dinámicos ayudaron a reubicar dos plataformas, lo que redujo la perforación de reposición esperada en aproximadamente un 15 %.



Seguridad en la normativa: Leapfrog proporciona un registro de auditoría completo para el consentimiento acelerado de recursos.

[Lea la historia completa →](#)



El modelado dinámico en Leapfrog nos proporcionó la agilidad necesaria para perfeccionar los objetivos mientras las plataformas seguían en funcionamiento, sin comprometer el registro de auditoría que exigen los organismos reguladores”

Geólogo sénior de desarrollo

Contact Energy (proyecto Tauhara)



CAPÍTULO 3

Simulación fiable de caudal, presión y potencia de salida

El análisis volumétrico del calor *in situ*, la densidad de potencia y la curva de declive proporcionan estimaciones del potencial de los recursos, pero no captan los bucles de retroalimentación entre la reducción del yacimiento, la producción del pozo y la reinyección, ni cómo los gases no condensables (non-condensable gases, NCG) podrían afectar la generación.

Los prestamistas comerciales ahora exigen previsiones para todo el yacimiento que consideren estas interacciones, informen sobre los megavatios P10/P50/P90 y demuestren que se cumplirán los límites de sismicidad inducida y hundimiento. Para proporcionar esa evidencia se necesita un simulador que incorpore la interpretación geológica de Leapfrog Energy y se actualice rápidamente a medida que llegan nuevos datos.

Volsung aplica una formulación de volumen finito para resolver las ecuaciones de equilibrio de masa y energía con el fin de calcular el flujo de masa y calor a través de la roca del yacimiento, incluidos los medios porosos y fracturados.

Los modelos de pozos se pueden combinar con modelos de yacimientos para predecir la capacidad de producción del pozo según la termodinámica del yacimiento y las condiciones del pozo, lo que a su vez proporciona información a los modelos de instalaciones en superficie para calcular la generación de energía. El solucionador maneja flujos de agua y vapor en una o dos fases, condiciones supercríticas, mezclas de agua, sal y gases no condensables, transporte de trazadores y respuestas a la microgravedad y al hundimiento.

Los enfoques de computación paralela en el aceleramiento de las CPU y GPU reducen el tiempo de resolución hasta 25 veces en comparación con los enfoques tradicionales, lo que ayuda a los ingenieros a desarrollar modelos más detallados en menos tiempo.

Los flujos de trabajo de calibración comienzan con la comparación de los resultados del modelo del yacimiento

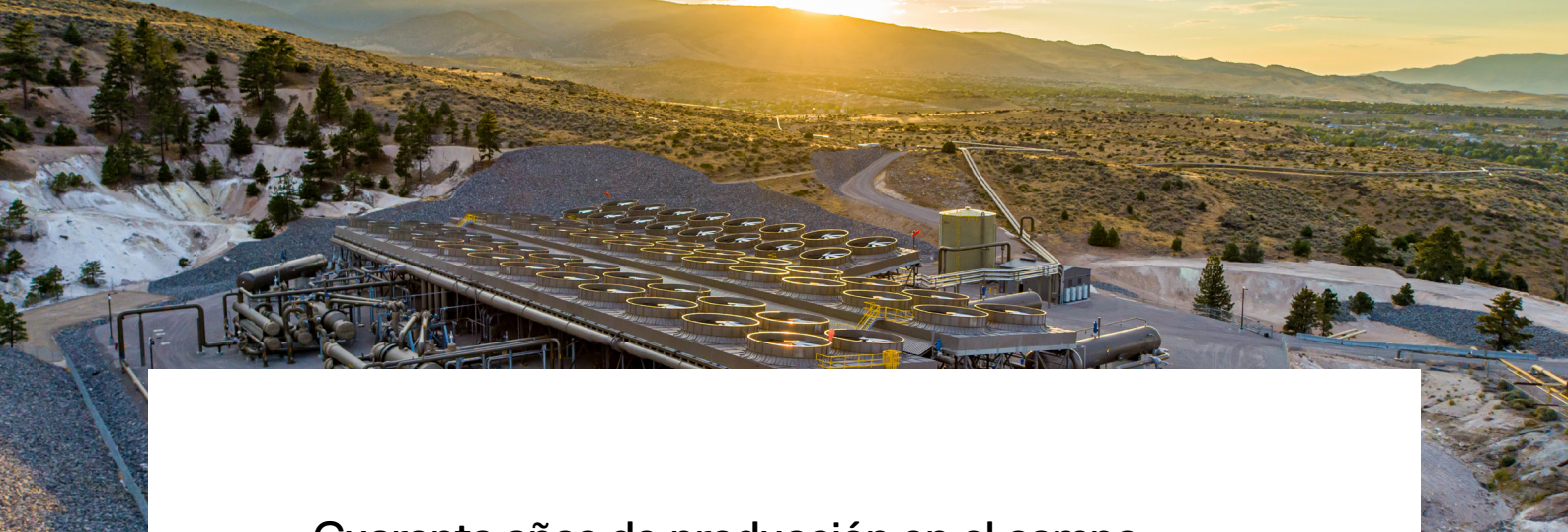
con los datos medidos de temperatura y presión del pozo, en un proceso conocido como calibración en estado natural.

La calibración continúa simulando el historial de producción de un recurso y comparando la producción modelada y medida del pozo, la entalpía y la reducción de la presión del yacimiento. La calibración también puede incluir respuestas a la microgravedad y datos de pruebas con trazadores. Se puede realizar de forma manual o mediante métodos de modelado inverso. Una vez lograda una calibración satisfactoria, se pueden ejecutar previsiones simulando las respuestas futuras del yacimiento y el desempeño del pozo bajo diversas estrategias de desarrollo.

Se pueden implementar los métodos de Montecarlo para realizar estas previsiones en condiciones de incertidumbre.

Luego, las partes interesadas pueden comparar los resultados para evaluar la estrategia óptima de desarrollo de recursos. Volsung informa sobre la





Cuarenta años de producción en el campo geotérmico de Steamboat

Ormat Technologies desarrolló un modelo numérico del reservorio para mantener niveles sostenibles de temperatura y presión. Se utilizó la modelación numérica para comprender mejor las rutas de flujo de los fluidos, predecir el rendimiento a largo plazo bajo distintos escenarios y optimizar las estrategias de reinyección para una producción sostenible.

La aplicación del modelo resultó en una mayor coherencia entre las observaciones de campo y los modelos computacionales, una mejor comprensión de la relación entre las estructuras del reservorio y las rutas de flujo de los fluidos, y decisiones más informadas para la previsión y gestión de los recursos.

“Nuestro modelo numérico ha sido fundamental para orientar nuestras decisiones operativas y de gestión del reservorio en Steamboat. Nos ha proporcionado información valiosa sobre el comportamiento complejo del sistema geotérmico.”

Sulav Dhakal

Ingeniero de yacimientos geotérmicos, Ormat Technologies

Para conocer más sobre cómo Ormat utilizó Volsung para optimizar 40 años de producción geotérmica y mejorar la gestión del reservorio en el sitio de Steamboat, **lea la historia completa →**

Este estudio de caso fue desarrollado de forma independiente por **Ormat y refleja el análisis interno y la experiencia operativa de Ormat →**



CAPÍTULO 4

Entender el subsuelo con una solución geotérmica completa

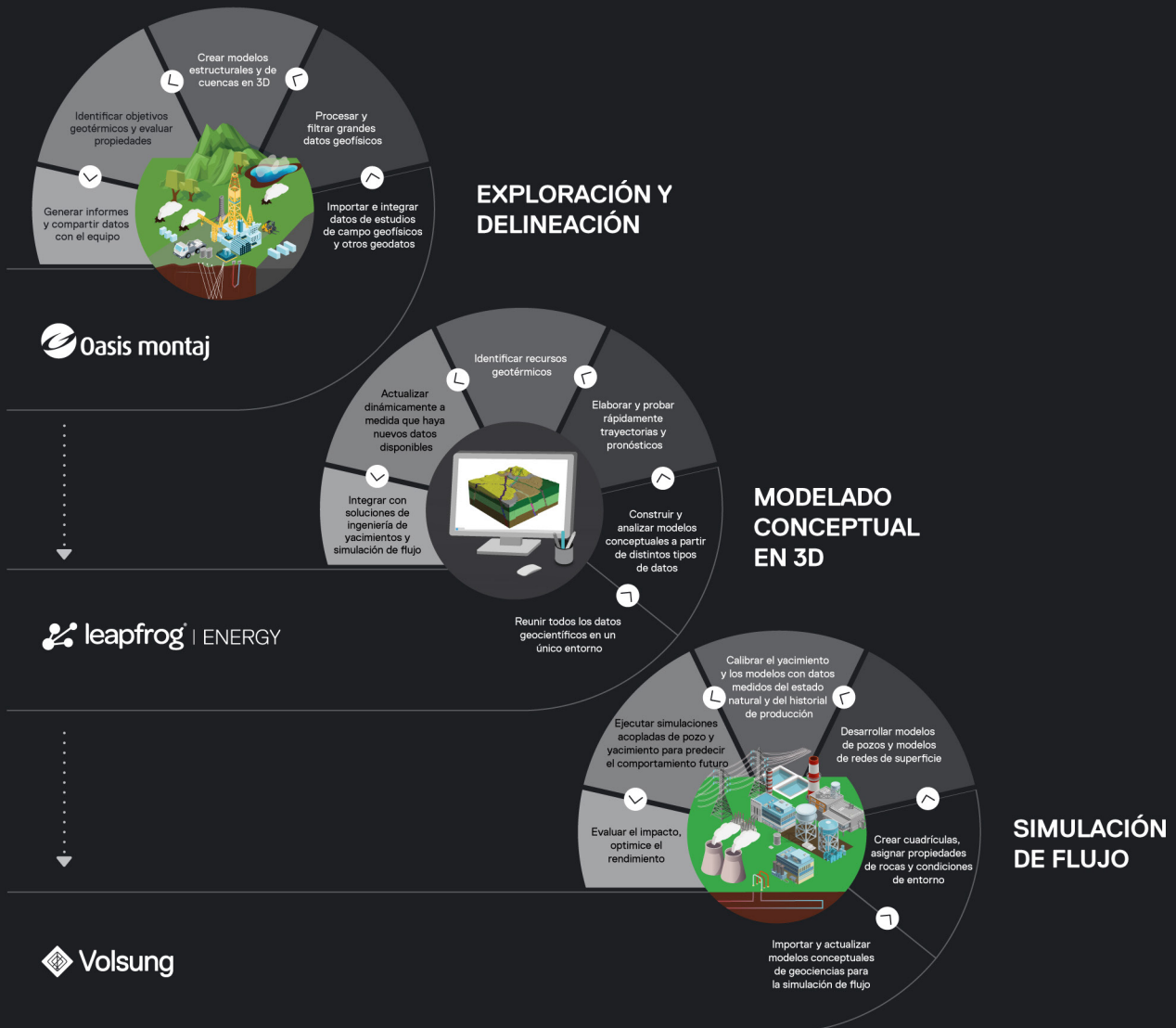
La exploración, el modelado y la simulación avanzan más rápido cuando todas las disciplinas ven los datos correctos en el mismo espacio de trabajo, sin tener que buscar la carpeta más reciente.

En el flujo de trabajo geotérmico de Seequent, Oasis montaj apoya la exploración geotérmica en etapa inicial mediante el procesamiento y el modelado de datos magnéticos y gravitacionales, y la visualización de volúmenes de resistividad MT generados externamente. Esto ayuda a los geocientíficos a interpretar las estructuras del subsuelo e identificar características como fallas, zonas de alteración o vías de fluidos; datos clave para perfeccionar los modelos conceptuales antes de que comience el modelado geológico.

Estos conjuntos de datos se exportan y se llevan a Leapfrog Energy, donde los geólogos los integran con registros de pozos, datos de alteración y estudios de campo de presión, temperatura y rotación (Pressure, Temperature and Spinner, PTS) para crear un modelo conceptual dinámico en 3D. Luego, ese modelo se importa a Volsung, que simula el flujo del yacimiento, el rendimiento del pozo y la generación de energía utilizando un enfoque de volumen finito.

Si bien el intercambio de datos entre herramientas implica pasos manuales, Seequent Central proporciona un entorno compartido y auditable para el control de versiones, la comparación de modelos y la colaboración, lo que garantiza que los equipos multidisciplinarios se mantengan alineados durante todo el ciclo de vida del proyecto.

Flujo de trabajo conectado del producto Geothermal



Más de 7,400

clientes utilizan el software de Seequent en más de 140 países

Leapfrog Energy

se utiliza en proyectos que generan el 60 % de la energía geotérmica a nivel mundial

Más del 95%

de satisfacción con nuestros servicios de ayuda y asistencia de primera línea



CAPÍTULO 5

El futuro de las geociencias: innovación, educación y colaboración

En Seequent, nuestro compromiso con la energía geotérmica es muy sólido. Como empresa creada por geocientíficos para geocientíficos, estamos constantemente superando los límites de lo posible con herramientas y tecnologías innovadoras. Al combinar la experiencia técnica con el diseño centrado en el usuario, creamos una cartera de soluciones, como Oasis montaj, Leapfrog Energy y Volsung, que no solo mejoran la forma en que entendemos el subsuelo, sino que también hacen que procesos históricamente dispares sean más integrados, accesibles e intuitivos.

Cómo inspirar a la próxima generación de geocientíficos

Reconocemos la necesidad de inspirar y formar a la próxima generación de geocientíficos. Por eso, hemos desarrollado [Visible Geology](#), una aplicación web gratuita diseñada para dar vida a los conceptos geológicos tanto para estudiantes como para educadores. Visible Geology va más allá de los métodos tradicionales de enseñanza en 2D y ofrece a los estudiantes una experiencia inmersiva de aprendizaje en 3D.

Con sus capacidades intuitivas de modelado en 3D, funciones colaborativas para el aula y redes estereográficas digitalizadas, Visible Geology ayuda a los estudiantes a comprender conceptos geológicos fundamentales de una forma cautivadora. Los educadores pueden integrar esta herramienta en sus planes de estudio sin dificultad, modernizando la experiencia de aprendizaje y atrayendo a los estudiantes gracias a la presentación interactiva de topografías, secciones transversales, muestras de núcleos, etc.

Al incentivar a los estudiantes a explorar el mundo del subsuelo en un entorno digital innovador, Seequent está contribuyendo enormemente a forjar el futuro del campo de las geociencias.

Para obtener más información,
consulte Visible Geology



**Descubra hoy el poder
de un flujo de trabajo de
tecnología geotérmica
conectada**

Visite seequent.com/leapfrog-energy
para explorar videos de productos,
historias de éxito de los clientes o
solicitar una prueba gratuita de 14 días o
una demostración en tiempo real.

Comprenda el subsuelo para construir un mundo mejor.

Seequent, The Bentley Subsurface Company, ayuda a otras empresas a comprender el subsuelo y les brinda la confianza necesaria para tomar mejores decisiones con mayor rapidez.

En Seequent, diseñamos una tecnología líder en el mundo que está a la vanguardia de las ciencias de la tierra, lo que les permite transformar la manera en que trabajan nuestros clientes.

Todos los días les ayudamos a desarrollar recursos minerales fundamentales de manera más sostenible; diseñar y construir mejores infraestructuras; obtener energía renovable y reducir su impacto en el medioambiente.

Seequent brinda servicios en más de 145 países y mantiene con orgullo su sede central en Nueva Zelanda.